

## Oddziaływanie wiatru na budynki wysokie w świetle badań własnych i ujęć normowych

Tomasz Lipecki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Katedra Mechaniki Budowli, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,  
e-mail: t.lipecki@pollub.pl*

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono analizę oddziaływania wiatru na budynki wysokie, przeprowadzoną zgodnie z zaleceniami Eurokodu 1 oraz według wyników badań własnych, wykonanych w tunelu aerodynamicznym Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej. Analizowano 10 budynków o tych samych proporcjach, 5 o stosunku wymiarów przekroju poprzecznego 1:2 oraz 5 o stosunku 1:4. W każdym przypadku przyjęto napływ na ścianę dłuższą (N1) oraz krótszą (N2). Sumaryczne siły parcia wiatru oraz przemieszczenia wierzchołków i momenty zginające u podstawy budynków przyjęto jako wyniki pozwalające porównywać dwa podejścia.

**Słowa kluczowe:** budynek wysoki, oddziaływanie wiatru, tunel aerodynamiczny, współczynnik średniego ciśnienia.

### 1. Wprowadzenie

Przyjęcie oddziaływanie wiatru na budynki wysokie stanowi poważne wyzwanie dla projektantów. W dobie, gdy budowane są coraz wyższe, często smuklejsze i o wyszukanych kształtach konstrukcje wieżowców oddziaływanie wiatru zarówno w kierunku średniej prędkości jak i w kierunku prostopadłym do niej musi zostać poprawnie obliczone, szczególnie, że przy wysokich konstrukcjach może stanowić najpoważniejsze obciążenie. Wciąż jest niewystarczająca ilość pomiarów określających oddziaływanie wiatru w skali rzeczywistej, choć z USA, Japonii i Chin pochodzi coraz więcej takich danych. Alternatywą do badań in situ są pomiary modelowe w tunelach aerodynamicznych, które przy nietypowych kształtach budynków często stanowią jedyną dostępną dla inżynierów drogę. Przykłady badań modelowych dotyczących rzeczywistych budynków opisują m.in. prace: Li i in. [1], Cluni i in. [2]. Również w Polsce, choć oczywiście w mniejszej skali niż w USA, Dalekim i Bliskim Wschodzie powstaje coraz więcej budynków wysokich. Przykładami realizacji z ostatnich lat są: Sky Tower we Wrocławiu, Rondo 1, Złota 44, Warsaw Trade Center w Warszawie, natomiast w trakcie budowy są Warsaw Spire czy Cosmopolitan (Hines) w Warszawie.

Procedury normowe pozwalające na obliczenie oddziaływania wiatru są w większości przypadków dość skomplikowane, a ponadto znacząco się między sobą różnią (por np.: Zhou i in. [3], Kwon i Kareem [4]). W literaturze przedmiotu można znaleźć wiele wyników badań modelowych na przekrojach prostokątnych, jednak większość z nich dotyczy badań modeli dwuwymiarowych i są to przeważnie badania nad odpowiedzią aeroelastyczną na oddziaływanie wiatru. Z drugiej strony wciąż nie wiele jest prezentowanych wyników dotyczących opływu modeli trójwymiarowych, w warunkach przepływu odpowiadającego atmosferycznemu. Takie badania w ostatnich latach wykonywali m. in. Tanaka i in. [5], Rosa i in. [6] oraz autor niniejszej pracy wraz ze współpracownikami.

W niniejszej pracy podjęto próbę porównania sposobu przyjmowania oddziaływania wiatru na budynki wysokie o prostym przekroju poprzecznym w kształcie prostokąta, według procedury proponowanej w Eurokodzie 1 (PN-EN 19991-1-4:2005 [7], Żurański i Gaczek [8]) z wynikami własnych badań modelowych, które zostały przeprowadzone w Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej. W trakcie badań zmierzono ciśnienia dynamiczne na ścianach 5 modeli sztywnych prostopadłościanów o stosunku boków przekroju poprzecznego 1:2 (3 modele) i 1:4 (2 modele) i różnej smukłości. Eksperyment prowadzono przy różnych wariantach struktury wiatru.



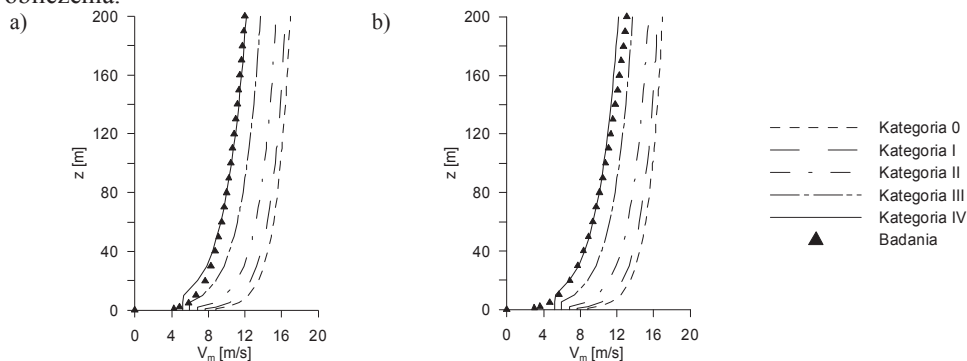
### 3. Wyniki badań modelowych

Do analizy obciążenia wiatrem wybrano dwa przypadki struktury wiatru, którą zmierzono w tunelu aerodynamicznym, nazywane tutaj profilem 1 i profilem 3. Szeroką analizę struktury wiatru przedstawiono m.in. w pracach Bęc i in. [9] oraz Lipecki i Jamińska [10]. Przedstawione w niniejszej pracy profile wyrażono wzorem potęgowym:

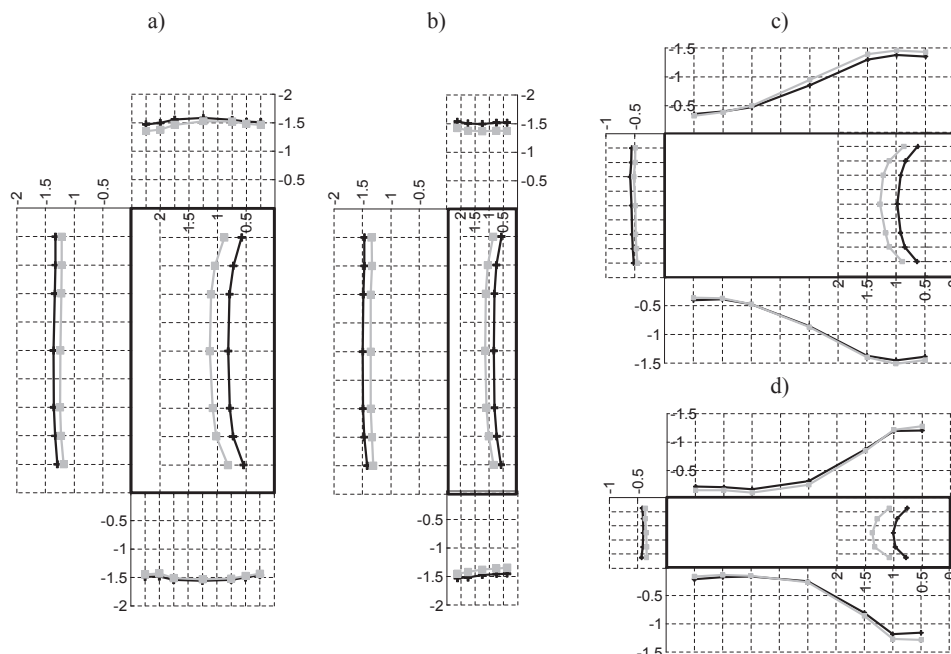
$$V_m(z) = kz^\alpha, \quad (1)$$

w którym, dla profilu 1:  $k = 4,259$ ,  $\alpha = 0,1952$ , natomiast dla profilu 3:  $k = 2,9947$ ,  $\alpha = 0,2781$ .

Na Rys. 2 pokazano porównanie profili zmierzonych w tunelu z rekomendowanymi przez Eurokod 1, opisanymi wzorem logarytmicznym, do 200 m. Uzyskano dobrą zgodność dla terenu kategorii IV i dla parametrów tego terenu przeprowadzono dalsze obliczenia.



Rys. 2. Porównanie profili obliczonych według Eurokodu 1 z wynikami pomiarów przeprowadzonych w tunelu aerodynamicznym, a) profil 1, dla prędkości 9,788 m/s, b) profil 3, dla prędkości 9,799 m/s.



Rys. 3. Przykładowe wartości współczynników średniego ciśnienia  $c_p$  na poziomie pomiarowym 2, a) model R1, kąt  $0^\circ$ , b) R2, kąt  $90^\circ$ , c) R1, kąt  $0^\circ$ , d) R2, kąt  $90^\circ$ , + – profil 1, ■ – profil 3.

W trakcie badań modelowych zmierzono ciśnienia dynamiczne na ścianach 5 pionowych, prostopadłościennych modeli, o stosunku wymiarów przekroju poprzecznego 1:2 (3 modele) oraz 1:4 (2 modele) i różnej smukłości. Na modelach przyjęto 16 poziomów pomiarowych, na których zainstalowano, w zależności od wymiarów przekroju poprzecznego od 20 do 28 punktów pomiarowych. Na podstawie zarejestrowanych w czasie  $T = 30$  s, z krokiem czasowym  $\Delta t = 0,005$  s przebiegów czasowych ciśnień obliczono wartości średnie, które unormowano przez średnie ciśnienie dynamiczne zmierzone przed modelem w obszarze przepływu niezaburzonego, otrzymując współczynniki ciśnienia  $c_p$ . Do dalszej analizy wybrano współczynniki średniego ciśnienia dla modeli R1 (1:2,  $H = 100$  cm,  $D = 40$  cm,  $B = 20$  cm) oraz R2 (1:4,  $H = 100$  cm,  $D = 40$  cm,  $B = 10$  cm). Rozkłady obwodowe współczynników na poziomie pomiarowym 2, zlokalizowanym 8 cm od wierzchołka modeli przedstawiono na Rys. 3, dla dwóch kątów natarcia wiatru  $0^\circ$  i  $90^\circ$ . Wyniki przeprowadzonych badań były prezentowane m. in. W pracach Lipecki i in. [11], Lipecki i Jamińska [12].

#### 4. Analiza obliczeniowa oddziaływania wiatru

Jako przykłady obliczeń przyjęto budynki żelbetowe o stosunku wymiarów przekroju poprzecznego 1:2 oraz 1:4 i parametrach zestawionych w Tabeli 2.

W obliczeniach przyjęto następujące założenia: 1) I strefa wiatrowa, w której prędkość bazowa  $V_{b,0} = 22$  m/s, 2) IV kategoria terenu, w której  $z_{min} = 10$  m,  $z_0 = 1$  m, 3) logarytmiczny dekrement tłumienia  $\delta_s = 0,1$ , 4) częstotliwość drgań własnych obliczono według wzoru uproszczonego,  $f_1 = 46/H$ , 5) wysokość odniesienia  $z_s = 0,6H$ , 6) skala  $S$  oznacza skalę budynku rzeczywistego do modelowego.

Rozpatrzono dwa przypadki: 1) Napływ na ścianę dłuższą – N1, 2) Napływ na ścianę krótszą – N2.

Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem zaleceń Eurokodu 1 oraz na podstawie wyników badań własnych. W Tabeli 3 zestawiono podstawowe obliczenia wykonane zgodnie z Eurokodem 1 służące do wyznaczenia współczynnika konstrukcyjnego  $c_s c_d$  według dwóch alternatywnych procedur (załączniki B i C), dla budynków 1-3 o stosunku wymiarów przekroju 1:2. W każdym przypadku (budynki 1-10) różnica między wynikami była poniżej 1% i do dalszych obliczeń przyjmowano wartość większą.

Tabela 2. Wymiary budynków oraz założenia przyjęte w analizach.

	D/B = 1:2							D/B = 1:4		
	Bud. 1	Bud. 2	Bud. 3	Bud. 4	Bud. 5	Bud. 6	Bud. 7	Bud. 8	Bud. 9	Bud. 10
$H$ [m]	100	125	150	175	200	150	175	200	225	250
$D$ [m]	40	50	60	70	80	60	70	80	90	100
$B$ [m]	20	25	30	35	40	15	17,5	20	22,5	25
$f_1$ [Hz]	0,460	0,368	0,307	0,263	0,230	0,307	0,263	0,230	0,204	0,184
$z_s$ [m]	60	75	90	105	120	90	105	120	135	150
$S$ [-]	1:100	1:125	1:150	1:175	1:200	1:150	1:175	1:200	1:225	1:250

Tabela 3. Wyznaczenie współczynnika konstrukcyjnego  $c_s c_d$  dla budynków 1-3.

Tabela 5. Wyznaczenie współczynnika konstrukcyjnego $c_{st}$ dla budynków 1-3.															
Budynek 1				Budynek 2				Budynek 3							
		N1		N2		N1		N2		N1		N2			
$L(z_s)$	[m]	133,904				155,497				175,701					
$V_m(z_s)$	[m/s]	21,107				22,258				23,198					
$f_{li}(z_s)$		2,918				2,571				2,323					
$S_L(z_s)$		0,066				0,071				0,075					
$I_o(z_s)$		0,244				0,232				0,222					
Załącznik		B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B	C		
$B^2$		0,519	0,444	0,543	0,464	0,508	0,425	0,532	0,445	0,498	0,409	0,523	0,43		
$R^2$		0,067	0,099	0,116	0,172	0,08	0,118	0,136	0,202	0,091	0,135	0,155	0,229		
$\nu$	[Hz]	0,156	0,196	0,193	0,239	0,136	0,171	0,166	0,206	0,121	0,153	0,147	0,181		
$k_p$		3,211	3,282	3,277	3,342	3,168	3,241	3,232	3,297	3,131	3,205	3,193	3,257		
$c_s$		0,824	0,789	0,834	0,799	0,822	0,785	0,833	0,794	0,821	0,78	0,831	0,791		
$c_d$		0,986	1,020	1,017	1,063	0,986	1,024	1,019	1,07	0,986	1,028	1,021	1,077		
$c_s c_d$		0,812	0,805	0,849	0,849	0,811	0,803	0,848	0,85	0,809	0,802	0,848	0,851		

W kolejnych Tabelach 4 i 5 przedstawiono sposób wyznaczenia wartości ciśnień w przypadku napływów N1 i N2 dla budynku 1. Warto zwrócić uwagę na różną ilość poziomów pośrednich na ścianie zewnętrznej, przyjętych w związku z różnym wymiarem prostokątnym do napływu. W tabelach przyjęto zgodnie z normą następujące oznaczenia: ABC – strefy na ścianie bocznej, D – ściana zewnętrzna, E – ściana wewnętrzna. W kolejnych kolumnach Tabel 4 i 5 zestawiono wartości charakterystyk wiatru ( $z_e$  – wysokość odniesienia,  $V_m$  – prędkość średnia,  $I_v$  – intensywność turbulencji,  $q_p$  – ciśnienie szczytowe,  $c_e$  – współczynnik ekspozycji,  $c_s, c_d$  – współczynniki konstrukcyjne), współczynniki ciśnienia  $c_{pe}$ , ciśnienia i siły wywołane parciem. Parcie wiatru  $w_x$  oraz siłę  $W_x$  na danym poziomie wyznaczono według wzorów:

$$w_x = q_v(z_e) \cdot c_{pe} \cdot c_s c_d, \text{ przy czym: } c_{pe} = c_{pe,D} - c_{pe,E} \quad (2)$$

$$W_x = w_e \cdot A_{ref}, \quad (3)$$

w których  $A_{ref}$  – pole powierzchni, na którą oddziałuje wiatr.

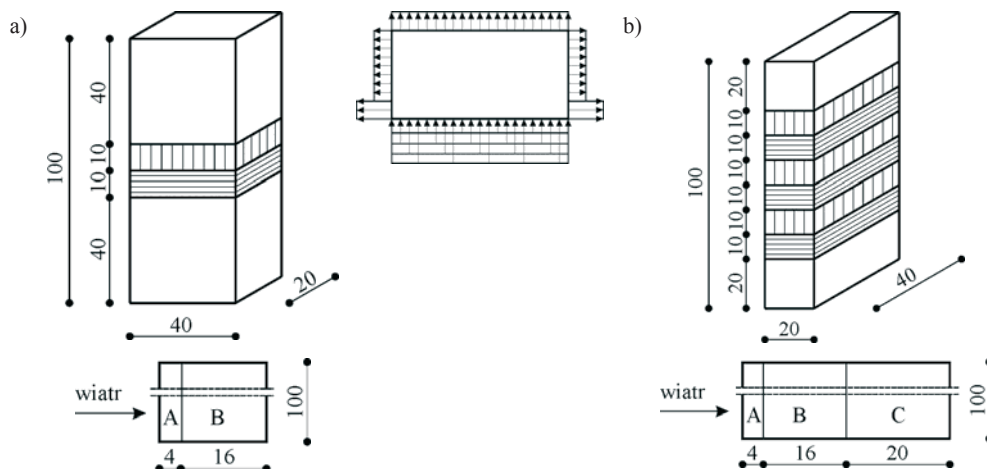
W obliczeniach pominięto zmniejszenie obciążenia w skutek braku korelacji ciśnień na ścianach nawierzchniej i zawietrznej. Na Rys. 4 pokazano przyjęte poziomy obliczeniowe w przypadku budynku I i napływów N1 i N2.

Tabela 4. Wyznaczenie parcia wiatru w przypadku budynku 1 i napływu N1.

$z_e$	$V_m(z_e)$	$I_V(z_e)$	$q_P(z_e)$	$c_e(z_e)$	$c_{sCd}$	$c_{pe}$				$w_x$	$A_{ref}$	$W_x$
[m]	[m/s]		[Pa]			D	A	B	E	[Pa]	[m <sup>2</sup> ]	[kN]
100	23,741	0,217	887,716	2,935	0,812	0,8	-1,2	-0,8	-0,7	1081,7	1600	1301,6
60	21,107	0,244	754,506	2,494						919,4	400	352,3
50	20,167	0,256	709,061	2,344						864,0	400	374,9
40	19,017	0,271	654,943	2,165						798,1	1600	1764,2

Tabela 5. Wyznaczenie parcia wiatru w przypadku budynku 1 i napływu N2.

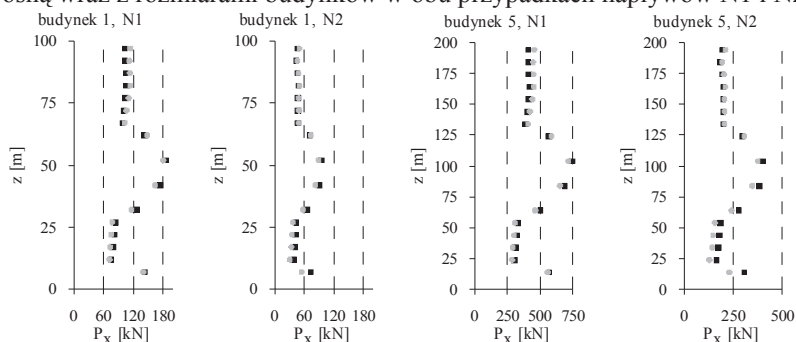
$z_e$	$V_m(z_e)$	$I_v(z_e)$	$q_p(z_e)$	$C_e(z_e)$	$C_s C_d$	$C_{pe}$					$w_x$	$A_{ref}$	$W_x$
[m]	[m/s]		[Pa]			D	A	B	C	E	[Pa]	[m <sup>2</sup> ]	[kN]
100	23,741	0,217	887,716	2,935	0,849	0,8	-1,2	-0,8	-0,5	-0,575	1035,9	400	414,4
80	22,59	0,228	828,46	2,739							966,8	200	193,4
70	21,902	0,235	793,791	2,624							926,3	200	185,3
60	21,107	0,244	754,506	2,494							880,5	200	176,1
50	20,167	0,256	709,061	2,344							827,4	200	165,5
40	19,017	0,271	654,943	2,165							764,3	200	152,9
30	17,534	0,294	587,614	1,943							685,7	200	137,1
20	15,444	0,334	497,387	1,644							580,4	400	232,2



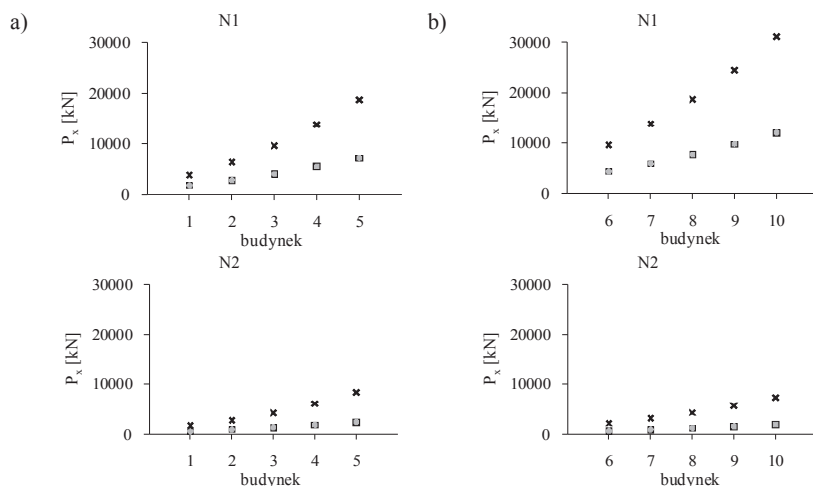
Rys. 4. Przyjęcie poziomów obliczeniowych w przypadku budynku 1, a) napływ N1, b) napływ N2.

Według badań własnych wartości ciśnień wyznaczono w poszczególnych punktach odpowiadającym miejscom, w których wyznaczono współczynniki, mnożąc je przez  $0,5\rho v_b^2$ , gdzie  $v_b = 22$  m/s. Siły pochodzące od parcia wiatru wyznaczono natomiast mnożąc ciśnienia przez pola, z których zostały zebrane i odnoszące się do rzeczywistego budynku (a więc przeskalowanego w stosunku do modelu). Następnie zsumowano siły na poszczególnych poziomach otrzymując w rezultacie sumaryczną wartość na każdym z 16 poziomów pomiarowych. Analogicznie jak w Eurokodzie, przyjęto ciśnienia odejmując wartości ze ściany zawietrznej od ściany nawietrznej. Siły aerodynamiczne przemnożono przez współczynnik  $c_s c_d$  wyznaczony procedurą Eurokodu. W niniejszej pracy analizie poddane zostały obciążenia w kierunku działania wiatru, a więc siły parcia wiatru. Rozkład pionowy sił parcia obliczonych na podstawie badań, dla budynków 1 i 5 w dwóch wariantach struktury wiatru i dwóch kierunkach napływu pokazano na Rys. 5. W badaniach modelowych w każdym przypadku siły zostały wyznaczone na tych samych poziomach, natomiast w obliczeniach według Eurokodu rozkłady te zmieniały się zarówno dla kierunków napływu jak i dla poszczególnych budynków. Zestawienie wartości sumarycznych sił parcia wiatru uzyskanych na podstawie badań i Eurokodu przedstawiono na Rys. 6.

Wartości sił parcia obliczone na podstawie badań (Rys. 5) są do siebie bardzo zbliżone pomiędzy profilami 1 i 3, przy czym powyżej ok.  $0,7H$  nieznacznie większe wartości uzyskano dla profilu 3, natomiast poniżej tej wysokości dla profilu 1, co jest zgodne z kolejnością wartości prędkości wiatru. Zdecydowanie większe sumaryczne wartości sił otrzymano według Eurokodu. Różnice bezwzględne pomiędzy wartościami Eurokodu i badań rosną wraz z rozmiarami budynków w obu przypadkach napływów N1 i N2.

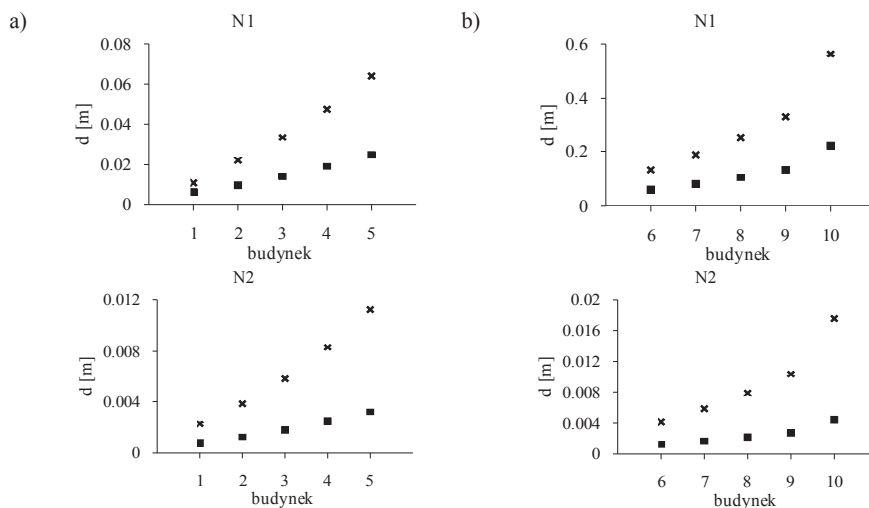


Rys. 5. Porównanie sił parcia wiatru według badań modelowych, ■ – profil 1, ● – profil 3.

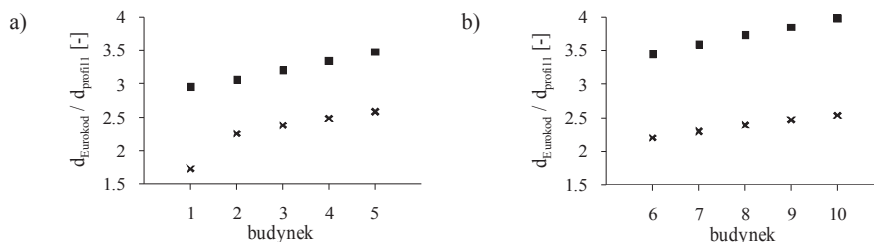


Rys. 6. Całkowita wartość sił parcia działających na budynki, a) budynki 1:2, b) budynki 1:4, ■ – profil 1, ● – profil 3, × – Eurokod.

Pelniejsze porównanie oddziaływań wiatru przedstawiono za pomocą przemieszczeń wierzchołka i momentów zginających u podstawy. Wartości tych nie należy odnosić do realnych budynków, jako, że obliczenia przeprowadzono dla modeli uproszczonych. Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem Autodesk Algor Simulation Professional 2010 dla każdego budynku i wariantu napływu. Przyjęto uproszczony przekrój poprzeczny, zgodny z wymiarami konstrukcji i grubością ścian zewnętrznych 25 cm. Na Rys. 7 zestawiono przemieszczenia wierzchołków budynków, zaś na Rys. 8 stosunek tych przemieszczeń w celu zobrazowania różnic między wynikami obliczeń. Podobne stosunki wartości uzyskano w przypadku momentów zginających.



Rys. 7. Przemieszczenia wierzchołków: a) budynki 1:2, b) budynki 1:4, ■ – profil 1, × – Eurokod.



Rys. 8. Stosunek przemieszczeń: a) budynki 1:2, b) budynki 1:4, × – napływ N1, ■ – napływ N2.

## 5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że uzyskane profile wiatru spełniają w wystarczającym stopniu kryterium podobieństwa do profili rekomendowanych przez Eurokod. Należy zaznaczyć, że w pracy niniejszej nie analizowano znaczenia innych parametrów struktury wiatru, takich jak profil turbulencji oraz gęstość widmowa mocy, które mają znaczący wpływ na rozkłady współczynników średniego ciśnienia.

W procedurze przyjmowania obciążenia wiatrem według Eurokodu zastosowano dwie procedury wyznaczania współczynnika konstrukcyjnego  $c_s c_d$ . W każdym przypadku otrzymano różnice mniejsze niż 1%. Większe wartości dla każdego budynku występują przy napływie N2, przy czym, przy napływie N1, większe  $c_s c_d$  uzyskano według załącznika B, zaś przy napływie N2 według załącznika C.

Dużo większe wartości sił parcia wiatru oraz przemieszczenia wierzchołków i momenty zginające przy podstawie uzyskano w każdym przypadku według obliczeń przeprowadzonych zgodnie z Eurokodem. Różnice między podejściem normowym i badaniami rosną wraz ze wzrostem współczynnika skalowania  $S$ , przykładowo, w



przypadku przemieszczeń budynków 1-5 oraz napływu N1 –występuje wzrost od 1,722 do 2,579 (Rys. 8a).

Analizując napływ N1 i ten sam wymiar ściany dla modeli 1:2 (budynki 3-5) i 1:4 (budynki 6-8) większe różnice między podejściami występują w przypadku modeli 1:2.

## Literatura

- 1 Li Q.S., Fu J.Y., Xiao Y.Q., Li Z.N., Ni Z.H., Xie Z.N., Gu M. Wind tunnel and full-scale study of wind effects on China's tallest building. *Engineering Structures* 28 (2006) 1745–1758.
- 2 Cluni F., Gusella V., Spence S.M.J., Bartoli G. Wind action on regular and irregular tall buildings: Higher order moment statistical analysis by HFFB and SMPSS measurements. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 99 (2011) 682–690.
- 3 Zhou Y., Kijewski T., Kareem A. Along-wind load effects on tall buildings: comparative study of major international codes and standards. *Journal of Structural Engineering* 128(6) (2002) 788–796.
- 4 Kwon D.K., Kareem A. Comparative study of major international wind codes and standards for wind effects on tall buildings. *Engineering Structures* 51 (2013) 23–35.
- 5 Tanaka H., Tamura Y., Ohtake K., Nakai M., Kim Y.C. Experimental investigation of aerodynamic forces and wind pressures acting on tall buildings with various unconventional configurations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 107-108 (2012) 179–191.
- 6 Rosa L., Tomasini G., Zasso A., Aly A.M. Wind-induced dynamics and loads in a prismatic slender building: A modal approach based on unsteady pressure measurements. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 107–108 (2012) 118–130.
- 7 PN-EN 19991-1-4:2005. Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2007.
- 8 Żurański J.A., Gaczek M. Oddziaływania klimatyczne na konstrukcje budowlane według Eurokodu 1. Komentarz z przykładami obliczeń. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 2011.
- 9 Bęc J., Lipecki T., Błazik-Borowa E. Research on wind structure in the wind tunnel of Wind Engineering Laboratory of Cracow University of Technology. *Journal of Physics: Conference Series* 318, 072003, doi: 10.1088/1742-6596/318/7/072003, 2011.
- 10 Lipecki T., Jamińska J. Influence of wind structure and aspect ratio of circular cylinders on mean wind pressure coefficient. *Task Quarterly* 16 (3) (2012) 201–216.
- 11 Lipecki T., Bęc J., Błazik-Borowa E. Surface pressures on rectangular cylinders – the dependence on aspect ratio, wind structure and angle of wind attack. *Proc. 7<sup>th</sup> BBAA7, China, 2012.*
- 12 Lipecki T., Jamińska P., Analysis of wind pressure distribution on the surface of 2:1 rectangular cylinder. *Proc. of the XX KKMP2012, Gliwice, Poland, 2012.*

## Wind effects on tall buildings according to own measurements and code approach

Tomasz Lipecki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, e-mail: t.lipecki@pollub.pl*

**Abstract:** The paper presents the analysis of the wind action on tall buildings carried out in accordance with the recommendations of Eurocode 1, and with the results of own research conducted in the wind tunnel of the Wind Engineering Laboratory, Cracow University of Technology. Ten buildings of the same proportions were analyzed, five structures with the ratio of the cross-section dimensions of 1:2 and five of 1:4. The wind action on the longer side (N1) and on the shorter side (N2) were adopted in all cases of buildings. The total forces of wind pressure as well as displacements of top and bending moments at the base of the buildings were taken as the results which allowed to compare two different approaches.

**Keywords:** tall buildings, wind action, wind tunnel, mean pressure coefficient.